

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Робертс А. Натуральный каучук. — М.: Мир, 1990. — 695 с.
2. Zheng P., Chen W. Thermooxidative degradation natural rubber // Applied Polymer Science. — 2003. — № 6. — P. 227–232.
3. Roger P., Brown T. Ageing of Rubber — Accelerated Heat Ageing Test Results. — Shropshire: Rapra technology Ltd, 2001. — 155 p.
4. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергия, 1973. — 328 с.
5. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Энергия, 1968. — 464 с.
6. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. — М.: Атомиздат, 1989. — 484 с.
8. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. — Л.: Энергия, 1973. — 144 с.
9. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. — Л.: Машгиз, 1957. — 240 с.

Поступила 15.04.2010 г.

УДК 620.179.15:621.391:621.396.96:535.317.25

## АПЕРТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ТЕНЕВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ. Ч. I. ОДНОМЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

В.И. Солодушкин, В.А. Клименов, В.А. Удод, А.К. Темник

Томский политехнический университет

E-mail: vi\_s@mail.ru

Предложен алгоритм одномерной коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений в радиометрических системах контроля, Отмечено его преимущество по сравнению с алгоритмом, основанным на применении известной формулы инверсии апертурных искажений, и приведены примеры, иллюстрирующие эффективность его использования.

**Ключевые слова:**

Апертура, алгоритм коррекции искажений, радиометрическая система, неразрушающий контроль, теневое радиационное изображение.

**Key words:**

Aperture, algorithm correction of distortions, radiometric system, non-distruction control, shadow radiation image.

**Введение**

Теневое радиационное изображение, возникающее в результате просвечивания объекта контроля пучком ионизирующего излучения, несет в себе информацию о состоянии внутренней структуры контролируемого объекта. Осуществляемое в радиометрических системах контроля преобразование радиационного изображения в электрический сигнал неизбежно сопровождается апертурными искажениями, обусловленными, в частности, конечными размерами апертуры детектора излучения [1–5]. Вследствие этого информация об объекте контроля поступает на конечное регистрирующее устройство в искаженной форме.

Известные в настоящее время методы коррекции апертурных искажений, как правило, реализуются в частотной области, вследствие чего полная коррекция апертурных искажений оказывается принципиально невозможной из-за наличия нулей у передаточной функции апертуры детектора излучения [4, 6, 7].

Апертурные искажения порождают систематическую погрешность результатов измерения излучения в радиометрии. Данные искажения вызваны усредняющим свойством апертуры детектора излучения, что приводит к понижению контраста и «размытию» теневых радиационных изображений. Вследствие чего возникает необходимость

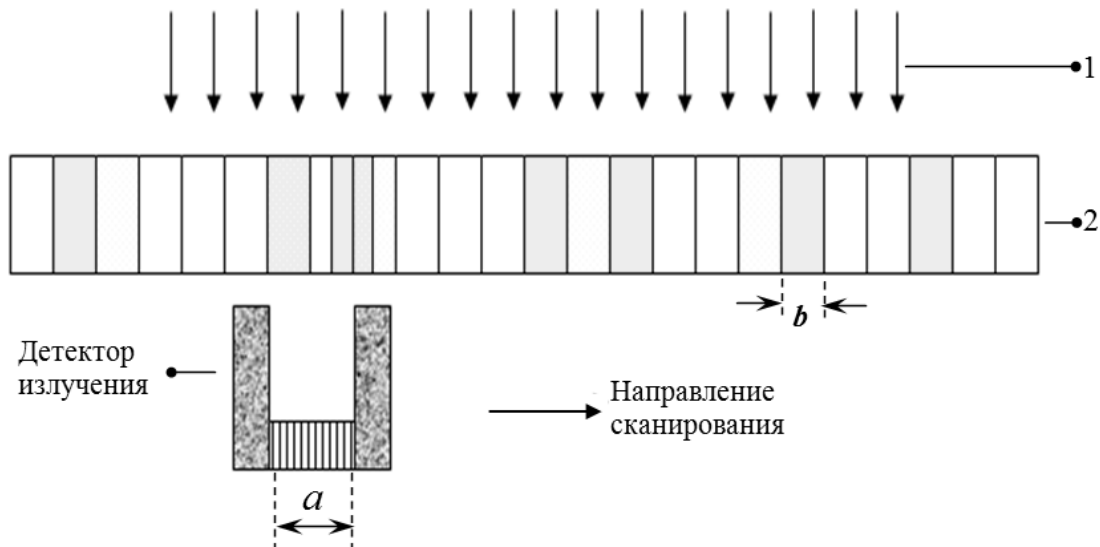
разработки эффективных алгоритмов коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений в радиометрических системах контроля.

**Алгоритм одномерной коррекции апертурных искажений**

Применительно к радиометрическим системам контроля апертурную трансформацию (искажение) одномерной функции (сигнала) можно описать уравнением [1, 2, 4]:

$$\int_{x-a}^x s(t)dt = y(x), \quad (1)$$

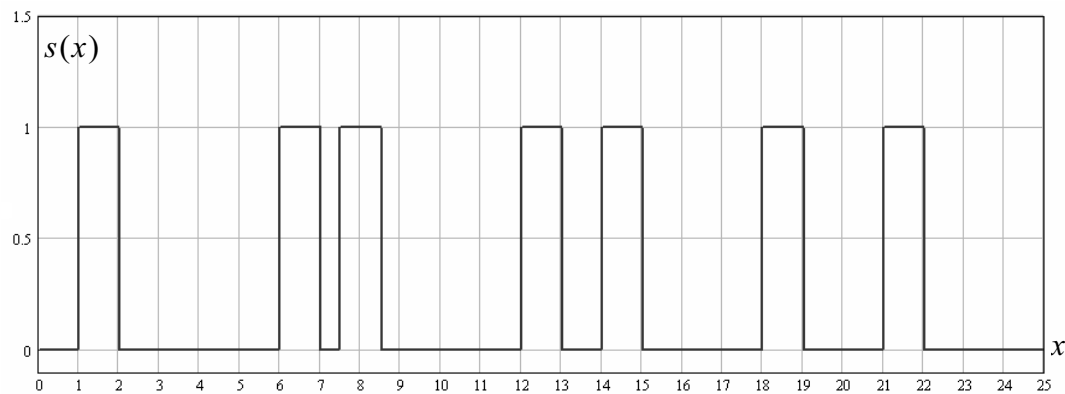
где  $a$  — размер апертуры детектора излучения в направлении сканирования;  $s(t)$  — строка теневых радиационного изображения по направлению сканирования объекта контроля детектором излучения (входной сигнал);  $y(x)$  — строка искаженного теневых радиационного изображения по направлению сканирования объекта контроля (выходной сигнал). Для наглядности описания апертурной трансформации в радиометрических системах контроля на рис. 1 приведена схема радиометрического контроля объекта, содержащего семь инородных включений, на рис. 2 — график входного сигнала, а на рис. 3, 4 — графики выходных сигналов для апертур различных размеров.



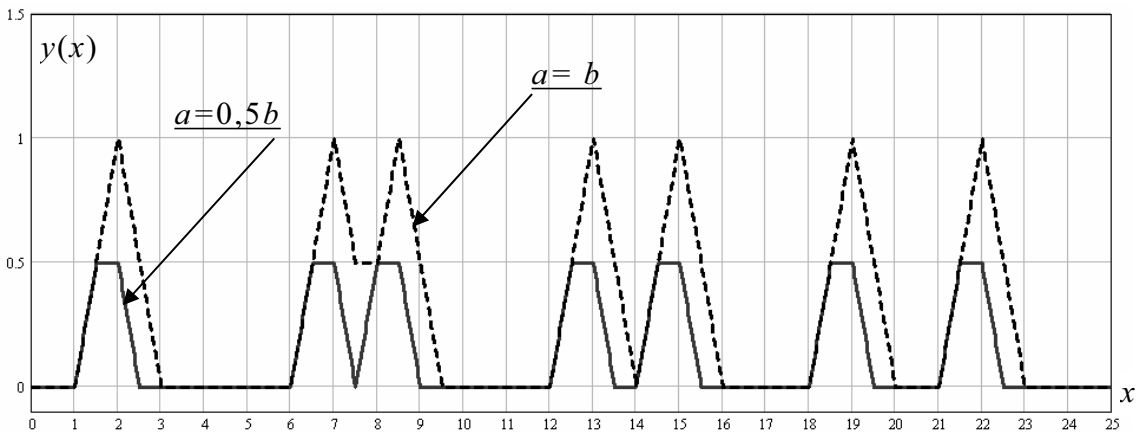
**Рис. 1.** Схема радиометрического контроля: 1) поток излучения; 2) объект контроля с 7-ю инородными включениями;  $a$  – размер апертуры детектора излучения в направлении сканирования;  $b$  – размер локального дефекта в направлении сканирования

Задача коррекции апертурных искажений состоит в том, чтобы в уравнении (1) по измеренному сигналу  $y(x)$  найти функцию  $s(t)$ . Решение данной задачи сопряжено с определенными трудностями.

Если предположить, что  $y(x)$  – непрерывно-дифференцируемая на всей числовой оси функция, а  $s(t)$  – непрерывная функция, то ур. (1) разрешимо (относительно  $s(t)$ ) неоднозначно. В указанном классе функций все решения уравнения (1) будут иметь вид:



**Рис. 2.** Входной сигнал:  $x$  – текущая координата вдоль направления сканирования, выраженная в длинах локального дефекта



**Рис. 3.** Выходной сигнал для апертуры длиной  $a=0,5b$  и  $a=b$

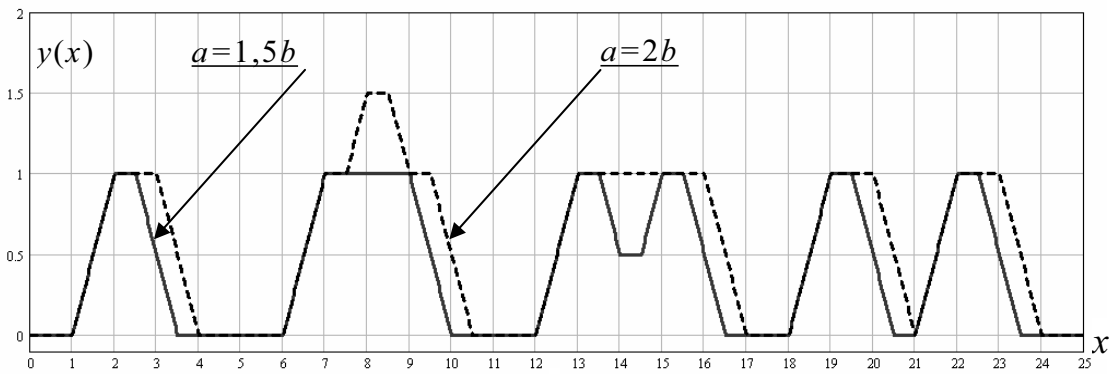


Рис. 4. Выходной сигнал для апертуры длиной  $a=1,5b$  и  $a=2b$

$$s(t) = s_0(t) + p(t),$$

где  $s_0(t)$  – некоторое фиксированное решение данного уравнения, а  $p(t)$  – произвольная непрерывная периодическая (с периодом  $T=a$ ) функция, удовлетворяющая условию

$$\int_0^a p(t) dt = 0.$$

Для однозначного разрешения уравнения (1) необходимы дополнительные условия (априорная информация), которым должна удовлетворять функция  $s(t)$ . Такой информацией может быть одно из условий:

1.  $s(t)=0$  при  $t<0$ .
2.  $\int_{-\infty}^0 s(t) dt$  – сходится.
3. Значения  $s(t)$  известны на отрезке  $[d; a+d]$ , где  $d$  – некоторое фиксированное число.

При выполнении ограничения 1) верна формула обращения (инверсии) [4]:

$$s(t) = \sum_{n=0}^m \frac{d}{dt} y(t-na), \quad (2)$$

где  $m$  равно целой части дроби  $t/a$ .

Отметим, что если  $t$  – время (или некоторая известная функция от времени), то преобразование по формуле (2) можно технически реализовать в аналоговом режиме (в реальном масштабе времени). Это утверждение вытекает из того, что для нахождения значения  $s(t)$  в момент времени  $t$  достаточно знать значения  $y(t)$  в моменты времени, не превосходящие  $t$ .

Формулу (2) можно представить и в другом виде:

$$s(t) = y(t) * h(t), \quad \text{где } h(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{d}{dt} \delta(t-na), \quad (3)$$

или

$$s(t) = \frac{d}{dt} s_0(t) \quad \text{где } s_0(t) = \sum_{n=0}^m y(t-na). \quad (4)$$

Здесь  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция Дирака; символ «\*» означает операцию свертки. Формула (3) будет также верна и при ограничении 2.

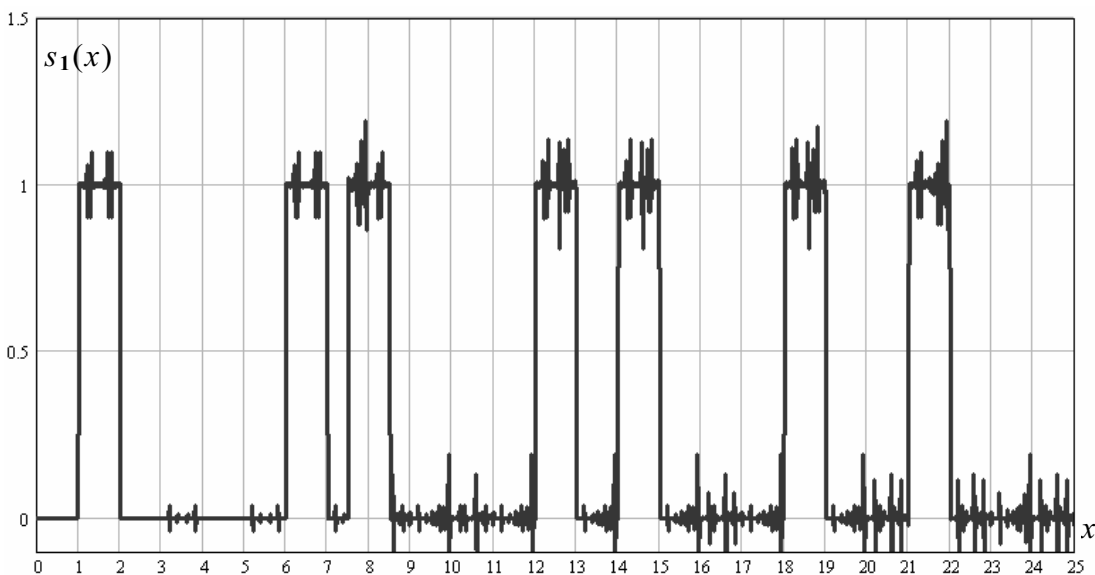


Рис. 5. Пример численного восстановления входного сигнала по «зашумленному» выходному сигналу на основе использования формулы обращения (2):  $s_1(x)$  – восстановленный сигнал

Численную реализацию алгоритма коррекции апертурных искажений на основе формулы (2) (или формул (3), (4)) можно записать в виде:

$$s(x) \approx \frac{M}{\Delta a} \sum_{i=-n_x}^{i=n_x} i s_0(x + i \Delta a),$$

где

$$M = \frac{3}{n_x(n_x + 1)(2n_x + 1)},$$

$\Delta a$  – шаг дискретизации сигнала  $s_0(x)$ , а  $2n_x + 1$  – количество отсчетов сигнала  $s_0(x)$ , используемых для оценки значения сигнала  $s(t)$  в точке  $x$ .

На рис. 5 приведен пример численной коррекции апертурных искажений входного сигнала на основе применения формулы обращения (2).

К недостаткам алгоритма, основанного на формуле инверсии (2), можно отнести:

- достаточно быстрое увеличение статистической погрешности восстановления (дисперсия восстановленного сигнала в точке  $x$  растёт пропорционально количеству слагаемых  $m$  равною целой части дроби  $x/a$ ), поскольку при радиометрических измерениях, как правило, сигнал  $y(x)$  зашумлен аддитивной помехой со слабокоррелированными значениями;
- увеличение объёма вычислений при численной реализации алгоритма, обусловленного ростом числа слагаемых в формулах обращения (2)–(4).

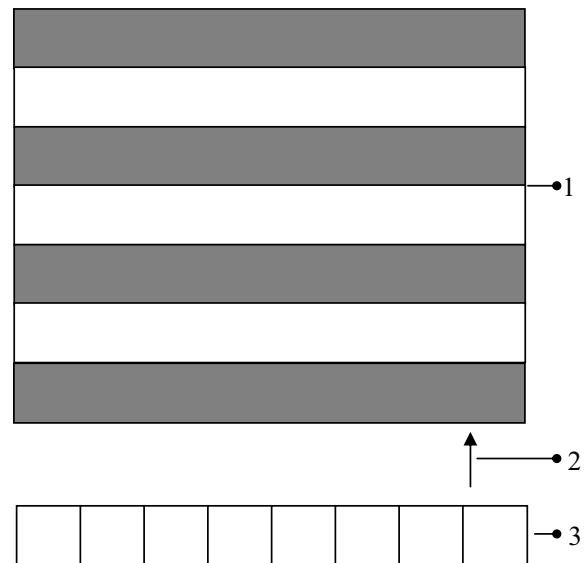


Рис. 6. Схема получения радиометрических данных: 1) пространственно-периодическая коллимационная пластина; 2) направление сканирования; 3) линейка детекторов

Предлагаемый нами в данной работе алгоритм коррекции обладает всеми достоинствами инверсии по формуле (2), и притом лишен недостатка «накопления шумов». Сущность алгоритма заключается в следующем. Весь объект контроля условно разбивается по направлению сканирования на чет-

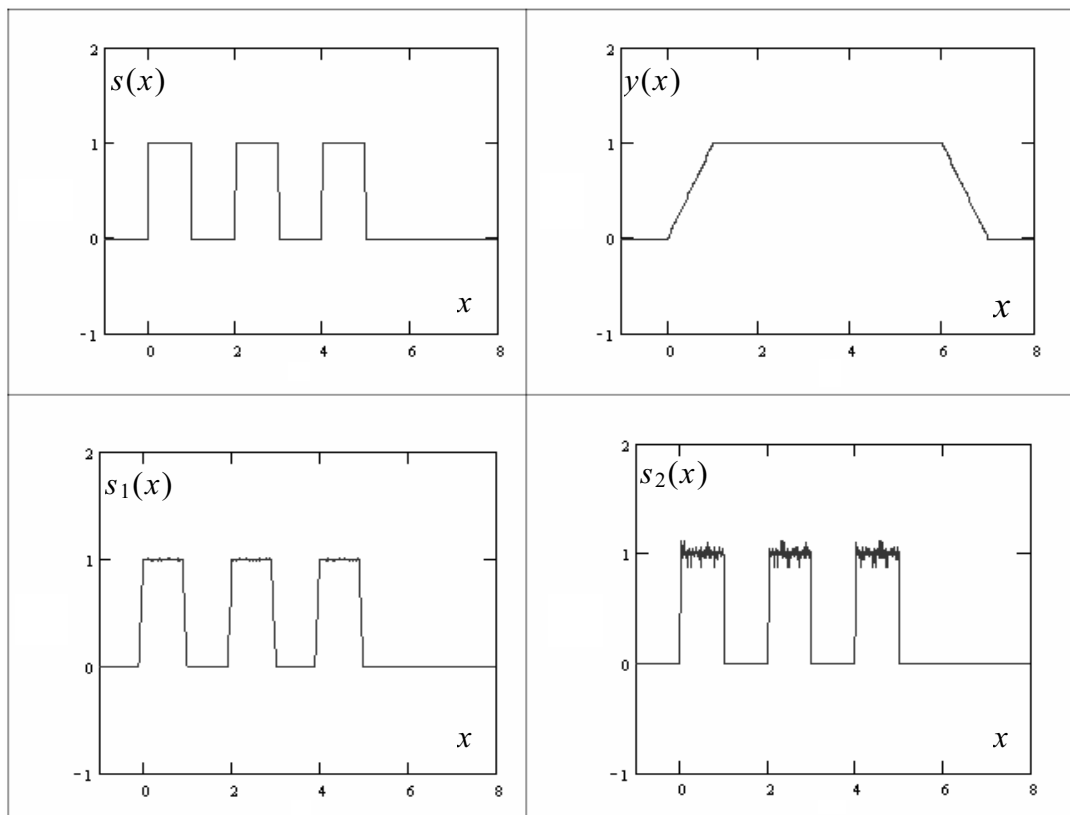


Рис. 7. Пример численного восстановления сигнала по предложенному алгоритму:  $s(x)$  – входной сигнал;  $y(x)$  – выходной сигнал;  $s_1(x)$  – восстановленный сигнал, усредненный скользящим средним с интервалом усреднения  $\Delta=0,05a$ ;  $s_2(x)$  – восстановленный сигнал, усредненный скользящим средним с интервалом усреднения  $\Delta=0,005a$

ные и нечетные участки, каждый из которых имеет протяженность, равную длине апертуры отдельного детектора из линейки. После этого между объектом контроля и линейкой детекторов устанавливается пространственно-периодическая коллимационная пластина, состоящая из прозрачных и непрозрачных к излучению участков, каждый из которых имеет протяженность по направлению сканирования, равную длине апертуры (рис. 6).

Затем осуществляется непрерывное сканирование объекта контроля линейкой детекторов, в результате считывается информация о теневом радиационном изображении на нечетных участках. Далее коллимационная пластина смещается по направлению сканирования на величину, равную длине апертуры, после чего линейка детекторов осуществляет сканирование объекта контроля в противоположном направлении. Происходит считывание информации о теневом радиационном изображении на четных участках. На завершающем этапе сигналы для каждого детектора, полу-

ченные с четных и нечетных участков, «склеиваются» в соответствии с порядком их пространственного формирования.

Пример численного восстановления сигнала по предложенному алгоритму при длине апертуры  $a=2b$  представлен на рис. 7.

#### Выводы

Предложен алгоритм коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений по направлению сканирования, основанный на пространственно-периодической модуляции потока излучения. Построчная реконструкция изображений по данному алгоритму обладает тем преимуществом, что количество вычислительных операций уменьшено по сравнению с общеизвестными алгоритмами инверсии.

*Работа выполнена в рамках программы развития Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» на 2009–2018 гг.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялкин Ф.М., Солодушкин В.И., Удод В.А. Коррекция апертурных искажений пространственным кодированием проекций // Тез. докл. II Всес. симп. по вычислительной томографии. – Куйбышев, 1985. – С. 57–58.
2. Sidulenko O., Solodushkin V., Udod V. Correction of aperture distortions in radiometric systems of radiation control // Proc. of the 5<sup>th</sup> Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. – Tomsk, June 26–July 3. – Tomsk, 2001. – P. 374–377.
3. Довнар Д.В., Предко К.Г. Метод устранения прямолинейного равномерного смаза изображения // Автометрия. – 1984. – № 6. – С. 94–97.
4. Сондхи М.М. Реставрация изображений: устранение пространственно-инвариантных искажений // Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин / под ред. Г. Эндрюса и Л. Инло. – М.: Мир, 1973. – 219 с.
5. Троицкий И.Н. О коррекции постоянной времени сглаживающего фильтра в сцинтилляционных гамма-дефектоскопах // Дефектоскопия. – 1973. – № 2. – С. 88–92.
6. Фриден Б. Улучшение и реставрация изображения // Обработка изображений и цифровая фильтрация / под ред. Т. Хуанга. – М.: Мир, 1979. – 320 с.
7. Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная по разрешающей способности одномерная фильтрация изображений // Оптика атмосферы. – 1991. – Т. 4. – № 10. – С. 1030–1034.

*Поступила 07.09.2010 г.*